

# Electrodynamical Processes in Sprites Derived from FORMOSAT-2/ISUAL Measurements

著者	足立 透
号	50
学位授与番号	2323
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/39382">http://hdl.handle.net/10097/39382</a>

氏 名・（本 籍）	あ だち とおる 足 立 透
学 位 の 種 類	博 士（理 学）
学 位 記 番 号	理 博 第 2 3 2 3 号
学位授与年月日	平 成 19 年 3 月 27 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研 究 科，専 攻	東北大学大学院理学研究科（博士課程）地球物理学専攻
学 位 論 文 題 目	Electrodynamical Processes in Sprites Derived from FORMOSAT-2/ISUAL Measurements (FORMOSAT-2衛星ISUAL観測によるスプライト電気力学過程の研究)
論 文 審 査 委 員	(主査) 教 授 福 西 浩 教 授 小 野 高 幸，森 岡 昭，岡 野 章 一 講 師 高 橋 幸 弘 助教授 村 田 功（環境科学研究科）

## 論 文 目 次

Abstract	v
Acknowledgements	vii
Contents	lix
1 Introduction	1
1.1 Lightning in the Earth's Environment	2
1.1.1 Processes of Lightning Discharge	2
1.1.2 Properties of Positive Lightning	5
1.1.3 Effects in the Middle and Upper Atmosphere	6
1.2 Sprites	8
1.2.1 Imagery and Photometry	8
1.2.2 Spectroscopy	9
1.2.3 Sprite-Producing Lightning	11
1.2.4 Theoretical Mechanism	12
1.3 Scientific Contributions	14
2 FORMOSAT-2/ISUAL	15
2.1 Scientific Objectives	15
2.2 Instrumentation	16
2.2.1 FORMOSAT-2 Satellite	16
2.2.2 ISUAL Payload	18

2.3	Operation of the ISUAL	22
2.4	Data of Sprite Events	26
3	Development of the Array Photometer	33
3.1	Flight Model	34
3.2	Environmental Test	37
3.3	Optical Performance Test	40
4	Spatiotemporal Variation of Electric Fields in Sprites	43
4.1	Blue/Red Emission Ratios Observed in Sprites	44
4.2	Theoretical Analysis	47
4.3	Spatiotemporal Variation of Electric Fields	53
4.4	Electric Fields in the Diffuse Region	56
4.5	Electric Fields in the Streamer Region	58
5	Lightning Current Moment and Sprite Morphology	61
5.1	Measurement of Lightning Luminosity	62
5.2	Measurement of ELF Magnetic Field	64
5.3	Temporal Evolution of Lightning Charge Moment	67
5.3.1	Analysis of Experimental Data	67
5.3.2	Theoretical Explanation	69
5.4	Lightning Processes	75
6	Conclusions and Suggestions for Future Research	85
6.1	Summary of Results and Conclusions	85
6.2	Suggestions for Future Research	88
	Bibliography	90

## 論文内容要旨

近年に発見された雷雲上空に発生する超高層発光現象は、それまで想像の域を超えることのなかった地球対流圏と中間圏及び下部電離圏の電気的な結合の存在を実証した。スプライトと名づけられたこの発光は、雷雲地上間放電に伴って高度50-90 kmの中間圏に発生する放電現象である。近年の地上光学・電磁波観測は、スプライトやそれを誘起する雷雲地上間放電の特徴を明らかにしてきた。しかしながら、大気減光効果の不確定性のためにスプライトの正確な発光スペクトルを見積る事はできず、内部の詳細な電気力学過程も未だ明らかになっていない。また、1地点における光学観測可能範囲は約1000 kmと限られているため、現象の全球的な描像も未解明の問題として残されている。本研究は、FORMOSAT-2衛星搭載ISUAL観測器を用いて、全球に発生するスプライトの時空間構造と発光スペクトルを正確に観測し、内部の電気力学過程を解明することを目的としている。

まず始めに、台湾国家太空中心 (National Space Organization), 台湾国立成功大学, 米国カリフォルニア大学バークレー校, 及び東北大学の国際協力のもと, ISUALを構成する3種類の観測器の一つであるアレイフォトメータの開発を行った。アレイフォトメータは340-480 nm (青) と510-750 nm (赤) の波長域を観測する2つのフォトメータからなる。センサーとして用いた多チャンネル光電増倍管は鉛直に16の視野を有しており, 衛星から3106 kmの距離に位置する地球のリムを観測する場合, その鉛直空間分解能は約14 kmに相当する。データ取得はある閾値以上の明るさを有する現象が発生した時のみに行われ, 初期の10 ms または18 msの間は50 マイクロ秒の時間分解能で, 後続の230 ms または222 msの間は500 マイクロ秒の時間分解能でサンプリングする。ISUALは衛星が地球の夜側を飛翔する時に, その進行方向に垂直な地球リム方向の発光を観測し, 地球の自転に伴って1日に1度全球をサーベイする事ができる。

2004年7月4日から2005年6月25日の期間に, ISUALは482例のスプライトを観測した。観測されたスプライトを発光形態の違いによって分類したところ, ヘイローが128例, ストリーマが206例, 及びヘイローとストリーマがともに発生したもの (ヘイロー・ストリーマ) が126例であった。アレイフォトメータによって得られたデータを解析したところ, 各分類で明瞭な時空間構造の相違が認められた。ヘイローイベントは, 雷放電から約0.3 msの遅延時間でその発光が開始し,  $1.0 \times 10^8$  m/sを超える速度で下方に伝播する事が明らかになった。ヘイロー・ストリーマイベントでは, まずヘイローが約0.3 msの遅延時間で発生し, その直後に, ストリーマがヘイローの下部から  $1 \times 10^7$ - $1 \times 10^8$  m/sの速度で下方に伝播することが確かめられた。さらに, ストリーマイベントは約3 msの遅延時間で発生し,  $1 \times 10^7$ - $1 \times 10^8$  m/sの速度で上下の両方向に進展する事が明らかになった。

スプライト内部における電気力学過程を明らかにするため, アレイフォトメータによって観測された発光の青/赤比を用いて, 電場強度の時空間変化を推定した。得られた電場強度は約75 kmに明瞭な遷移を有しており, スプライト上部の構造が見られないヘイロー領域から下部の微細構造が見られるストリーマ領域への形態遷移高度に対応する事が明らかになった。ヘイロー領域における電場強度は絶縁破壊電場強度 ( $E_b$ ) の0.6 - 0.8倍の値であった。これは, 大気分子がイオン化を伴わずに励起・発光する事が可能であるという理論予測を支持する結果である。その一方で, ストリーマ領域における電場強度は1-2  $E_b$  の値となり, 強いイオン化が起こっている事が確かめられた。しかしながら, 単体のストリーマを扱ったモデルの予測値に比べると数倍程度小さい値であり, 理論値と観測値に相違が認められた。これらの相違は, スプライトの内部に存在する上方分岐構造の下部領域やビーズ構造といった, 長期間持続する発光構造に起因すると結論付けられた。本研究で得られた結果は, スプライトの巨視的な形状を理解する上で, 単体のストリーマを扱うモデルは不十分であり, 複数のストリーマを相乗的かつ総括的に扱った新たな理論的枠組みが必要である事を示唆するものである。

スプライトと雷放電の電気的結合関係を明らかにするため, アレイフォトメータによって得られた光学データとELF帯の磁場強度データを用いて, 雷の電荷モーメントの時間変化を推定した。時定数 (電流モーメントの半値全幅) が約1 msと短い場合, 約400 C-kmの中規模な電荷モーメントを有する雷放電はヘイローのみを誘起するのに対し, 約1000 C-kmの大規模な電荷モーメントを有する雷放電は, ヘイローに加えてストリーマも誘起する事が明らかになった。その一方で, 時定数が約10 msと比較的長く, また約1000 C-kmの大規模な電荷モーメントを有する雷放電は, ストリーマのみを誘起する事が明らかになった。得られた結果は, ストリーマの発生に不可欠な時間変化しない絶縁破壊電場強度と, ヘイローの発生に必要な時間と共に増加する臨界電場強度を用いて解釈される事が明らかになった。さらに, スプラ

イトの生成に重要な役割を果たす雷の放電プロセスを推定した。アレイフォトメータによって観測された雷放電の発光強度や青/赤比を解析したところ、ヘイローやヘイロー・ストリーマの発生には、帰還電流が重要な雷プロセスである事が示唆された。その一方で、ストリーマの発生には、連続電流やMコンポーネントといった、帰還電流に後続するプロセスも重要な役割を果たす事が示唆された。また、ELF帯の磁場強度データを解析したところ、ヘイローは正負両極性の雷放電によって誘起され、ヘイロー・ストリーマやストリーマは主に正極性の雷放電によって誘起される事が明らかになった。これらの結果は、過去に観測された雷雲地上間放電の電気的特性と良く一致する事が確かめられた。しかしながら、本解析は雷放電の発光強度と電流強度に強い比例関係があることを仮定しているため、その厳密な関係を明らかにする上で、VLF帯電磁波観測データを用いたさらなる解析を行う必要がある。

本研究で我々が新たに開発したアレイフォトメータは、グローバルに発生するスプライトの時空間構造や発光スペクトルを精密に観測し、内部の電気力学過程を明らかにする上で、極めて有効な装置である事が示された。さらに本研究によって得られた、スプライトと雷放電の極めて強い電氣的結合に関する知見は、地球電磁環境のグローバルな理解に必要不可欠な要素である事が示された。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、FORMOSAT-2衛星搭載ISUAL観測器を用いて、全球に発生するスプライトの時空間構造と発光スペクトルを正確に観測し、未解明の問題として残されているスプライト発生 of 電気力学過程を解明することを目的としている。

まず、FORMOSAT-2衛星に搭載するISUAL観測器の開発を構成する3種類の観測器の一つであるアレイフォトメータのフライトモデルの開発において、各種の宇宙環境試験や性能試験を通してその完成に大きな貢献をした。アレイフォトメータは高度方向に16の視野をもち、青と赤の2波長でスプライトの時空間構造を高分解能でとらえることができる独創的な観測器である。次に、2004年7月から2005年6月の期間に、ISUALが観測した482例のスプライト現象の詳しい解析を行った。この解析の中で最も独創的な点は、スプライト内部における電気力学過程を明らかにするため、アレイフォトメータ観測から得られたスプライト発光の青/赤比データとモデル計算結果の比較によって、電場強度の時空間変化を推定したことである。得られた電場強度の高度分布は高度約75 kmで明瞭な遷移を示し、これがスプライト上部の内部構造をもたないヘイロー領域から下部の微細構造をもつストリーマ領域への形態遷移高度に対応することを明らかにした。さらにスプライト発生と雷放電の電氣的結合関係を明らかにするため、アレイフォトメータによって得られた光学データと東北大学ELF観測ネットワークから得られた磁場波形データを比較し、雷放電の電荷モーメントと放電時定数の2つのパラメーターによってヘイローとストリーマの発生条件が決定されることを明らかにした。

本研究で新たに開発されたFORMOSAT-2衛星搭載アレイフォトメータは、中間圏でグローバルに発生するスプライトの時間・空間構造と発光スペクトルを精密に観測し、スプライト内部の放電過程を明らかにする上で極めて有効な装置であることが示された。さらに本研究によって得られたスプライト発生 of 電気力学過程に関する新知見は、スプライト現象と雷放電現象の電氣的結合の統一的な理解を可能にした。これは著者が自立して研究活動を行うのに必要な高度な研究能力と学識を有することを示している。よって足立透提出の博士論文は博士（理学）の学位論文として合格と認める。